

PREDIKSI TRANSPORTASI SEDIMEN AKIBAT GERAKAN GELOMBANG IRREGULER

PREDICTION OF SEDIMENT TRANSPORT DUE TO IRREGULAR WAVE MOTION

Taufiqur Rachman¹ dan Suntoyo²

¹ Prodi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar
E-mail: ocean_d321@yahoo.com

² Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh
November (ITS), Kampus ITS Keputih-Sukolilo, Surabaya

ABSTRACT

In general, waves in coastal environments are irregular and have a random shape with a height and period that was not constant. The accuracy of sediment transport rate prediction is the most important stages in the study of morphology and coastal marine environments. In addition, the predictive model of coastal morphology is more efficient to use the bottom shear stress calculation approach for practical purposes rather than a more complex approach to the modeling of two phases. In this paper, the calculation of sediment transport was based on the bottom shear stress modelling purposed with data validation from the experimental results in the turbulent bottom boundary layer over rough bed under irregular waves. The new approach to estimate the bottom shear stress was based on combining velocity and acceleration terms. Furthermore, a new approach of the bottom shear stress was applied to formulate the sheet flow sediment transport rate for irregular waves by using the experimental data from Dibadjnia and Watanabe (1998) and the empirical formula was found.

Keywords: *sediment transport, bottom shear stress, irregular waves*

ABSTRAK

Pada dasarnya gelombang di lingkungan pantai adalah irreguler dan memiliki bentuk acak dengan tinggi dan periode tidak konstan. Keakuratan prediksi laju transportasi sedimen adalah tahapan terpenting dalam studi morfologi pantai dan lingkungan laut. Selain itu, prediksi pemodelan morfologi dekat pantai adalah lebih efisien jika menggunakan pendekatan perhitungan tegangan geser dasar untuk keperluan praktis daripada pendekatan yang lebih kompleks dengan pemodelan dua fase. Dalam makalah ini, perhitungan transportasi sedimen didasarkan pada pemodelan tegangan geser dasar yang diusulkan dengan validasi data dari hasil eksperimen *turbulent bottom boundary layer* di atas dasar kasar gelombang irreguler. Pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar ini didasarkan pada penggabungan kecepatan dan percepatan. Selanjutnya pendekatan baru tegangan geser dasar ini diterapkan untuk merumuskan laju transportasi sedimen *sheet flow* untuk gelombang irreguler dengan menggunakan data percobaan dari Dibadjnia dan Watanabe (1998) dan formulasi secara empiris diperoleh.

Kata kunci: *transportasi sedimen, tegangan geser dasar, gelombang irreguler*

I. PENDAHULUAN

Banyak peneliti telah melakukan kajian tentang lapisan batas turbulen (*turbulent boundary layer*) dan tegangan gesekan dasar (*bottom shear stress*) yang dikaitkan dengan transportasi sedimen (*sediment transport*) baik dilakukan secara numerik maupun pemodelan di laboratorium. Namun, kajian-kajian ini kebanyakan dilakukan akibat pergerakan gelombang linier/sinusoidal (misalnya Jonsson and Carlsen, 1976; Tanaka *et al.*, 1983; Sleath, 1987; Jensen *et al.*, 1989; Fredsøe and Deigaard, 1992). Hanya sebagian kecil yang melakukan kajian akibat gelombang-gelombang *non-linier* (misalnya Dibajnia and Watanabe, 1992; Wilson *et al.*, 1995; Cotton dan Stansby, 2000; Suntoyo *et al.*, 2008; Suntoyo dan Tanaka, 2009a; Suntoyo dan Tanaka, 2009b; Tanaka *et al.*, 2011).

Pada kenyataannya, gelombang-gelombang laut yang menjalar mendekati daerah dekat pantai mengalami proses-proses *non-linier*, dispersif dan tidak beraturan (*irregular*). Hal penting yang sangat mendasar di dalam rekayasa pantai akibat gerakan gelombang adalah efek gesekan dasar yang menyebabkan redaman gelombang dan transportasi sedimen. Kajian perilaku lapisan batas gelombang (*wave boundary layer*) yang dipengaruhi oleh efek kekasaran dasar dan percepatan untuk gelombang irreguler adalah berbeda dengan perilaku gelombang sinusoidal maupun *non-linier*. Dalam proses morfodinamika pantai, prediksi evolusi amplitudo puncak gelombang merupakan hal yang penting, karena kecepatan puncak gelombang menentukan besaran transportasi sedimen dan yang nantinya menyebabkan perubahan morfologi pantai.

Kajian hubungan *wave boundary layer* dengan transportasi sedimen untuk gelombang irreguler sangat jarang dilakukan, meskipun ada, namun

kebanyakan dibatasi untuk kondisi dasar halus (*smooth bed*) misalnya Samad dan Tanaka (1999) dan Tanaka dan Samad (2006), yang mana sangat berbeda dengan kondisi nyata di dasar pantai yang memiliki kekasaran dasar. Tanaka *et al.* (2002) telah melakukan kajian tentang tegangan geser dasar gelombang irreguler melalui pengujian di laboratorium dan mengusulkan metode estimasi tegangan geser dasar, tetapi hasilnya masih kurang sesuai dengan hasil percobaan. Huo *et al.* (2007) telah melakukan studi tegangan geser dasar gelombang irreguler tetapi lebih cenderung menekankan terhadap metode percobaan untuk kondisi dasar halus dan kasar. Baru-baru ini juga telah dilakukan percobaan yang dirancang untuk menguji hidrodinamika dan proses transportasi sedimen butiran kasar (*coarse grain*) di area *swash zone* untuk gelombang irreguler (Thompson *et al.*, 2012).

Untuk prediksi pemodelan morfologi pantai lebih efisien dilakukan jika menggunakan pendekatan perhitungan tegangan geser dasar untuk keperluan praktis daripada pendekatan yang lebih kompleks dengan pemodelan dua fase (Hsu dan Hanes, 2004). Estimasi tegangan geser dasar merupakan langkah yang paling penting dan diperlukan sebagai input untuk pemodelan transportasi sedimen dan keperluan praktis lainnya. Oleh karena itu, estimasi tegangan geser dasar didasarkan pendekatan gelombang sinusoidal dan *non-linier* perlu dievaluasi dengan melibatkan pengaruh ketidakaturan (*irreguleritas*) bentuk gelombang irreguler yang biasa terjadi di perairan pantai.

Kajian transportasi sedimen akibat gelombang *asymmetric* telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain, Dibajnia dan Watanabe (1992), Al-Salem (1993), Wilson *et al.* (1995), dan Suntoyo *et al.* (2006). Suntoyo *et al.* (2008) dan Suntoyo dan Tanaka (2009a; 2009b) juga

telah mengusulkan metode baru untuk mengestimasi besaran tegangan geser dasar akibat gelombang yang memiliki kemiringan (*skew wave*) yang didasarkan pada penggabungan efek kecepatan dan percepatan didalam perhitungannya dan metode baru ini memberikan nilai yang sesuai dengan hasil yang diperoleh percobaan. Malahan metode baru perhitungan tegangan geser dasar ini telah diterapkan untuk merumuskan formula transportasi sedimen akibat gelombang yang memiliki ketidaksimetrisan secara horizontal (*skew wave*) dimana hasil perhitungannya sangat bersesuaian dengan data percobaan transportasi sedimen dari Watanabe dan Sato (2004). Namun begitu koefisien percepatan untuk gelombang irreguler belum dikaji lebih lanjut.

Sebelumnya, Spielmann *et al.* (2004) telah mengembangkan model morfologi pantai dan menganalisa berbagai macam model pendekatan dan memasukkan parameter pokok dari gerakan gelombang, arus dan konsentrasi sedimen suspensi (*suspended sediment concentration*). Walaupun begitu model morfologi pantai ini masih memberikan hasil estimasi yang kurang akurat pada gerakan *sand bar* ke arah lepas pantai, kurang akuratnya prediksi ini sebelumnya juga telah teramati di dalam model-model morfologi pantai lainnya.

Umumnya *bed-load transport* tergantung pada tegangan geser dasar dan kecepatan gelombang di dekat dasar. Kajian-kajian tentang *wave boundary layer* dan gesekan dasar yang dikaitkan dengan pergerakan sedimen akibat pergerakan gelombang simetris atau gelombang sinusoidal telah dilakukan oleh banyak peneliti (e.g., Ahilan dan Sleath, 1987; Fredsøe and Deigaard, 1992). Kajian-kajian laju transportasi sedimen gelombang sinusoidal ini telah menunjukkan bahwa *net sediment transport* untuk satu periode gelombang adalah nol. Namun begitu kenyataan

gelombang di pantai adalah non-linier dan mempunyai ketidaksimetrisan antara puncak dan lembah gelombang dan ketidaksimetrisan percepatan yang teraktualisasi pada gelombang condong (*skew wave*) dimana *net sediment transport* dalam satu periode gelombang dihasilkan atau tidak sama dengan nol.

Dalam makalah ini dikaji metode perhitungan tegangan geser dasar dan laju transportasi sedimen dasar usulan Suntoyo *et al.* (2008) dan Suntoyo dan Tanaka (2009a; 2009b), serta diusulkan pendekatan baru untuk mengakomodasi efek yang ditimbulkan oleh irreguleritas gelombang irreguler dan kekasaran dasar (*roughness parameter*). Pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar dan laju transportasi sedimen dilakukan dengan pemodelan numerik dan selanjutnya divalidasi dengan data percobaan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat merumuskan model tegangan geser dasar dan bisa memperbaiki keakuratan dan kehandalan model transportasi sedimen gelombang irreguler dengan kondisi dasar kasar yang banyak terjadi di lingkungan pantai yang dihubungkan dengan model perubahan morfologi pantai. Dengan adanya model prediksi morfologi pantai yang handal maka kita bisa memprediksikan laju terjadinya erosi dan akresi pada garis pantai secara akurat.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan pemodelan numerik tegangan geser dasar kondisi dasar kasar gelombang irreguler dengan menggunakan *shear stress transport (SST) k- ω turbulent model* dan metode analisa percobaan terhadap hasil pengujian laboratorium Tanaka *et al.* (2002) sebagai validasi model. Pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar gelombang irreguler diusulkan dan diaplikasikan untuk pemodelan numerik transportasi sedimen. Pemodelan numerik

tegangan geser dasar dan transportasi sedimen ini dilakukan dengan *software Fortran*. Penelitian dilakukan dalam dua tahapan, yakni:

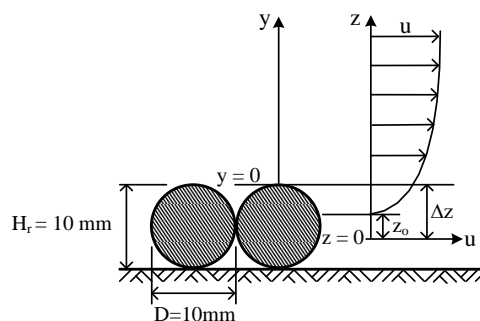
- i) Tahap pertama penelitian ini merupakan pemodelan tegangan geser dasar kondisi dasar kasar gelombang irreguler dengan menggunakan *SST k- ω turbulent model* yang diverifikasi dengan menggunakan data hasil percobaan Tanaka *et al.* (2002). Pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar untuk gelombang irreguler diusulkan dengan memasukkan variabel kecepatan dan percepatan dalam perhitungannya, yang diperoleh dari hasil modifikasi metode Suntoyo *et al.* (2008) untuk gelombang *saw-tooth* dan Suntoyo dan Tanaka (2009a; 2009b) untuk gelombang *asymmetric*. Selain diverifikasi dengan data percobaan Tanaka *et al.* (2002), pendekatan baru ini juga diuji dengan metode estimasi tegangan geser dasar eksisting, yakni metode yang diusulkan oleh Tanaka dan Samad (2006) dan Nielsen (2006).
- ii) Tahap kedua adalah pemodelan transportasi sedimen gelombang irreguler. Usulan pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar gelombang irreguler diaplikasikan pada pemodelan transportasi sedimen untuk merumuskan laju transportasi sedimen gelombang irreguler dan divalidasi dengan data percobaan Dibajnia dan

Watanabe (1998).

2.1. Eksperimen *Turbulent Boundary Layer Gelombang Irreguler*

Percobaan aliran turbulen gelombang irreguler melalui dasar kasar dilakukan oleh Tanaka *et al.* (2002) di dalam *oscillating wind tunnel* menggunakan udara sebagai fluida kerja. Gerak *oscillatory* dikendalikan dengan mekanisme komputer dan sinyal acak dihasilkan dengan menggunakan formulasi spektrum Bretschneider-Mitsuyasu. Pengukuran kecepatan dilakukan pada bagian tengah terowongan dan diambil 20 titik kearah vertikal dengan menggunakan Laser Doppler Velocimeter (LDV). Elemen kekasaran berbentuk bola aluminium dengan diameter 10 mm direkatkan pada permukaan dasar *wind tunnel* tanpa spasi sepanjang *wind tunnel*, sesuai Gambar 1.

Elemen kekasaran (tinggi kekasaran, $H_r=10$ mm) menonjol melalui viskos *sub-layer* pada bilangan Reynolds yang tinggi. Hal ini menyebabkan arus ikut (*wake*) di balik setiap elemen kekasaran, dan tegangan geser ditransmisikan ke dasar oleh tekanan *drag* pada elemen kekasaran, sehingga distribusi kecepatan di dekat dasar adalah logaritmik. Selanjutnya bisa diasumsikan bahwa *log-law* bisa digunakan untuk estimasi tegangan geser dasar dengan kondisi dasar kasar. Kondisi eksperimental diberikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Sketsa definisi kekasaran.

Tabel 1. Kondisi percobaan gelombang irreguler (Tanake *et al.*, 2002).

Eks.	$T_{1/3}(s)$	$U_{1/3}(cm/s)$	$\nu (cm^2/s)$	RE	S	k_s/y_h
1	3,0	392	0,148	$5,0 \times 10^5$	18,73	0,657

Variabel $T_{1/3}$ dan $U_{1/3}$ adalah periode gelombang signifikan dan kecepatan aliran bebas signifikan, ν : viskositas kinematis, k_s : tinggi kekasaran setara Nikuradse's, y_h : jarak dari dasar ke sumbu simetri *wind tunnel*, RE ($= U_{1/3}/T_{1/3}/2\pi\nu$): bilangan Reynolds dan S ($= U_{1/3}/T_{1/3}/2\pi y_h$): *Strouhal number*. Besaran bilangan Reynolds ditentukan agar kasus berada pada rezim turbulen kasar.

2.2. Deskripsi Turbulence Model

Komponen aliran persamaan Navier-Stokes pada *boundary layer* dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (1)$$

Pertama, komponen kecepatan sumbu-z, v pada *boundary layer* secara praktis nol, sehingga bentuk ketiga di bagian kiri persamaan hilang. Kedua, jarak- x lebih besar dari jarak z , sedangkan ketebalan *boundary layer* juga sangat tipis sehingga keberadaan- x pada persamaan di atas dapat diabaikan, sehingga bentuk kedua di bagian kiri persamaan juga hilang. Jadi, persamaan gerak aliran 1-D *incompressible unsteady* dalam *boundary layer* dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2)$$

dimana u : kecepatan horizontal sesaat, t : waktu, ρ : rapat massa fluida, dan p :

tekanan. Pada sumbu simetri atau di luar *boundary layer* $u=U=0$ dan $\tau=0$, oleh karena itu $\partial U/\partial t = -1/\rho \partial p/\partial x$ dan Persamaan (2) menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3)$$

Dengan memperkenalkan model viskositas eddy, tegangan geser total aliran turbulen dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{\tau}{\rho} = (v + v_t) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4)$$

dimana v_t : viskositas eddy yang menggambarkan tegangan Reynolds dan v : viskositas kinematik. Substitusi Persamaan (4) ke dalam Persamaan (3) sehingga diperoleh persamaan yang lebih sederhana untuk gerak aliran turbulen pada *bottom boundary layer* (Suntoyo dan Tanaka, 2009a).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left((v + v_t) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Model turbulen dapat digunakan untuk memprediksi properti turbulen akibat gerakan berbagai macam gelombang. *Shear stress transport (SST) k- ω model* merupakan salah satu *two-equation model* turbulen. *Shear stress transport (SST) k- ω model* juga merupakan bentuk gabungan antara formula penyempurnaan *k- ω model* di daerah dekat-dinding dengan *k- ε model* dalam lapis batas terluar yang diusulkan oleh Menter (1994). *SST k- ω model* diklaim lebih akurat dan diandalkan

untuk klasifikasi aliran yang lebih luas daripada $k-\varepsilon$ model standar sebaik $k-\omega$ model original, termasuk memperbaiki prediksi kerugian gradien tekanan aliran. Dalam SST $k-\omega$ model, pendefinisian viskositas eddy dimodifikasi dengan memperhitungkan prinsip efek transport dari tegangan geser turbulen. SST $k-\omega$ model menghasilkan viskositas eddy sedikit lebih rendah dari *baseline* (BSL) $k-\omega$ model pada pelat datar dengan gradien tekanan lapis batas nol.

Persamaan non linier *boundary layer* untuk model turbulen diselesaikan secara numerik dengan menggunakan Crank-Nicolson type implicit finite-difference scheme. Untuk mencapai akurasi yang lebih baik di dekat dasar, jarak grid diijinkan meningkat secara eksponensial. Tiap satu periode gelombang digunakan langkah 100 dalam ruang dan 7200 dalam waktu. Konvergen dicapai melalui dua tahap, tahap pertama konvergen yang didasarkan pada nilai *dimensionless* dari u , k dan ω pada setiap waktu selama satu siklus gelombang. Tahap kedua konvergen didasarkan pada harga maksimum *wall shear stress* dalam satu siklus gelombang. Batas konvergen ditetapkan pada nilai 1×10^{-6} untuk kedua tahapan tersebut. Penjelasan lengkap tentang teknik pemodelan disediakan dalam Suntoyo dan Tanaka (2008; 2009) dan Suntoyo (2006).

2.3. Metode Estimasi Tegangan Geser Dasar (*Bottom Shear Stress*)

Tegangan geser dasar hasil eksperimen dapat diestimasi dengan menggunakan *logarithmic-law*, yakni hubungan logaritmik antara *friction velocity* (U^*) dan variasi kecepatan terhadap kedalaman air sebagai berikut:

$$u = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (6)$$

$$U^* = \sqrt{\tau_o / \rho}; \quad z = y + \Delta z \quad (7)$$

Dimana, u : kecepatan aliran didalam *boundary layer* yang diukur dengan LDV di dalam *oscillating tunnel*; κ : konstanta von Karman's (=0.4); z : jarak lintas aliran dari *theoretical bed level* $z = y + \Delta z$; dan U^* : kecepatan gesek yang dikaitkan dengan tegangan geser dasar ($\tau_o = \rho U^* |U^*|$). Dengan memplot nilai u terhadap $\ln(z/z_o)$, garis lurus tergambarkan melalui data percobaan dan selanjutnya nilai kecepatan gesekan, U^* bisa diperoleh dari kemiringan garis ini.

2.4. Eksperimen Transportasi Sedimen Gelombang Irreguler

Validasi pemodelan transportasi sedimen dilakukan dengan menggunakan data percobaan transportasi sedimen gelombang irreguler dari hasil penelitian Dijbania dan Watanabe (1998). Pemodelan laju transportasi sedimen dilakukan dengan mengaplikasikan pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar gelombang irreguler.

Eksperimen *sheet flow* dilakukan dalam *loop-shape oscillatory/steady flow water tunnel*. Profil kecepatan pengujian transportasi sedimen diperoleh dengan pengukuran kecepatan di dekat dasar gelombang *shoaling* irreguler melalui *uniform slope* di *wave flume*. Pada eksperimen ini gelombang irreguler dibangkitkan dengan dua macam spektrum, yaitu spektrum Jonswap (ditandai huruf J) dan spektrum Bretschneider-Mitsuyasu (ditandai huruf M). Profil kecepatan terdiri atas 4 tipe (M1, M2, J1, dan J2) dimana profil kecepatan M1 dan J1 mengindikasikan derajat non-linieritas gelombang yang kuat.

Dalam percobaan ini laju transportasi sedimen bersih non-dimensional (Φ) diberikan sesuai

Persamaan (8), dimana, d : ukuran butiran sedimen ($=d_{50}$), W : kecepatan endap sedimen, dan q_{net} : laju transportasi volumetrik bersih per unit lebar bagian pengujian.

$$\Phi = \frac{q_{net}}{w d} \quad (8)$$

Sebanyak 28 eksperimen dilakukan dan laju transportasi sedimen bersih diukur. Data yang digunakan dalam penelitian ini hanya 24 data eksperimen dengan kondisi *steady* dan tanpa arus, sedangkan empat data eksperimen terakhir dilakukan dengan penambahan variabel arus. Pada beberapa studi sebelumnya, laju transportasi sedimen bersih non-dimensional juga dapat dihitung dengan Persamaan (9), dimana, ρ : densitas air dan g : percepatan gravitasi.

$$\Phi = \frac{q_{net}}{\sqrt{(\rho_s / \rho) g d_{50}^3}} \quad (9)$$

Laju transportasi sedimen untuk kondisi *sheet flow* diformulasikan dengan menggunakan data eksperimen eksisting dan mengaplikasikan pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar untuk menghitung laju transportasi sedimen gelombang irreguler.

Data eksperimen Dibajnia dan Watanabe (1998) ini digunakan sebagai input dan validasi pemodelan numerik laju transportasi sedimen gelombang irreguler. Data inputan awal yang dibutuhkan dalam pemodelan laju transportasi sedimen ini adalah variasi waktu (*time series*) kecepatan aliran bebas. untuk selanjutnya dapat dijadikan sebagai inputan dalam pemodelan laju *bed load* transportasi sedimen. Persamaan *time series* kecepatan aliran bebas gelombang irreguler menggunakan persamaan Kaczmarek and Ostrowski (1996) dengan pendekatan formula deret Fourier sebagai berikut,

$$U(t) = \sum_n U_n \sin(n \omega t + \varphi_n) + \frac{1}{2} U_o \quad (10)$$

Persamaan (10) ini dapat digunakan untuk merumuskan variasi waktu kecepatan aliran bebas dengan memasukkan parameter secara *trial and error* sehingga diperoleh parameter gelombang irreguler yang mendekati data percobaan Dibajnia dan Watanabe (1998). Profil kecepatan aliran bebas dihitung dengan Persamaan (3.16) –deret Fourier orde lima- dengan frekuensi (ω) 0,86 rad/s dan $U_o=8,2$ cm/s.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pendekatan Baru Estimasi Tegangan Geser Dasar

Tegangan geser dasar gelombang irreguler hasil eksperimen Tanaka *et al.* (2002) diuji dengan pendekatan perhitungan tegangan geser dasar eksisting. Suntoyo *et al.* (2008) dan Suntoyo dan Tanaka (2009) membandingkan metode-metode perhitungan tegangan geser dasar yang terdiri dari 2 buah metode yang sudah ada yaitu: Metode 1 adalah sebanding dengan kuadrat variasi waktu $U(t)$, yang diusulkan oleh Tanaka and Samad (2006) yang merupakan pendekatan tegangan geser dasar dari gelombang harmonik yang dimodifikasi dengan beda fase antara tegangan geser dasar dan kecepatan aliran bebas (*free stream velocity*) sebagai berikut:

$$\tau_o \left(t - \frac{\varphi}{\sigma} \right) = \frac{1}{2} \rho f_w U(t) |U(t)| \quad (11)$$

dimana $\tau_o(t)$: *instantaneous bottom shear stress*, t : waktu, φ : beda fasa antara tegangan geser dasar dan kecepatan aliran bebas, σ : frekuensi sudut, $U(t)$: *time history* kecepatan aliran bebas, dan f_w : koefisien gesekan gelombang sesuai persamaan,

$$f_w = \exp \left\{ -7,53 + 8,07 \left(\frac{a_m}{z_o} \right)^{-0,100} \right\} \quad (12)$$

Metode 2 adalah sebanding dengan kuadrat *instantaneous wave friction velocity*, $U_*(t)$ penggabungan efek percepatan seperti yang diusulkan oleh Nielsen (2002) pada Persamaan (13) dan (14). Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa komponen aliran *steady* lemah (misalnya pada kondisi *undertow* yang kuat, pada *surf zone*, dll.).

$$U_*(t) = \sqrt{f_w/2} \left\{ \cos \varphi U(t) + \sin \varphi \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right\} \quad (13)$$

$$\tau_o(t) = \rho U_*(t) |U_*(t)| \quad (14)$$

Koefisien gesek yang digunakan dalam metode 2 dihitung dengan Persamaan (15) seperti yang diusulkan oleh Nielsen (1992), sebagai berikut:

$$f_w = \exp \left\{ 5,5 \left(\frac{a_m}{k_s} \right)^{-0,2} - 6,3 \right\} \quad (15)$$

Sebuah pendekatan baru pertama estimasi tegangan geser dasar gelombang irreguler didasarkan pada penggabungan efek kecepatan dan percepatan yang diberikan dalam bentuk *instantaneous wave friction velocity*, $U^*(t)$ seperti yang diusulkan Suntoyo *et al.* (2008) dan Suntoyo dan Tanaka (2009) pada Persamaan (16). Pendekatan baru pertama estimasi tegangan geser ini selanjutnya disebut metode 3. Perbedaan fase ditentukan dari formula empiris untuk keperluan praktis (Rachman dan Suntoyo, 2011). Dalam pendekatan baru pertama ini diusulkan sebuah koefisien percepatan, a_c yang digunakan untuk mengekspresikan efek keacakan gelombang pada tegangan geser dasar gelombang irreguler

dan ditentukan secara empiris dari hasil eksperimen dan hasil pemodelan numerik *shear stress transport (SST) k - ω model*.

$$U^*(t) = \sqrt{f_w/2} \left\{ U \left(t + \frac{\varphi}{\sigma} \right) + \frac{a_c}{\sigma} \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right\} \quad (16)$$

Tegangan geser dasar seketika (*instantaneous bottom shear stress*), $\tau_o(t)$ dapat dihitung sebanding dengan kuadrat *instantaneous wave friction velocity*, seperti ditunjukkan pada Persamaan (17).

$$\tau_o(t) = \rho U^*(t) |U^*(t)| \quad (17)$$

Nilai koefisien percepatan, a_c diperoleh dari nilai rata-rata variasi waktu koefisien percepatan $a_c(t)$ yang dihitung dari hasil eksperimen tegangan geser dasar dan hasil pemodelan numerik *SST k - ω turbulence model*. Koefisien percepatan, a_c dinyatakan dengan Persamaan (18),

$$a_c(t) = \frac{U^*(t) - \sqrt{f_w/2} U \left(t + \frac{\varphi}{\sigma} \right)}{\frac{\sqrt{f_w/2}}{\omega} \frac{\partial U(t)}{\partial t}} \quad (18)$$

dimana, f_w : koefisien gesekan gelombang. Koefisien gesek diusulkan oleh Tanaka dan Thu (1994) seperti diberikan pada Persamaan (12) yang dapat digunakan untuk mengevaluasi Persamaan (18), $\tau_o(t)$: *instantaneous bottom shear stress*, dan φ : beda fase antara kecepatan aliran bebas dan tegangan geser dasar.

Pendekatan baru kedua perhitungan tegangan geser dasar (Metode 4) diturunkan dari variasi-waktu tegangan geser dasar dengan variasi waktu kecepatan aliran bebas $U(t)$ sesuai Persamaan (11). Namun variasi waktu kecepatan aliran bebas $U(t)$ dalam Persamaan (11) dimodifikasi dengan memasukkan variabel beda fase dan efek percepatan gelombang irreguler. Sedangkan nilai koefisien gesek dalam Persamaan (11) didasarkan pada usulan

Fredsøe dan Diegard (1992), sebagai berikut,

$$f_w = 0,041 R_e^{-0,16} \quad (19)$$

Tinjau *bottom boundary layer* gelombang irreguler untuk kondisi aliran laminar dan di atas dasar halus telah dilakukan oleh Samad (2000) dan dihasilkan variasi waktu tegangan geser dasar sesuai Persamaan (20).

$$\tau_o(t) = \frac{\rho}{2} 0,041 (\omega v)^{0,16} U(t) |U(t)|^{0,68} \quad (20)$$

Pendekatan estimasi tegangan geser dasar dengan persamaan diatas memberikan kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimen *bottom boundary layer* gelombang irreguler dengan kondisi aliran laminar dan di atas dasar halus. Namun estimasi tegangan geser di atas tidak dapat diaplikasikan untuk kondisi aliran turbulen, nilai tegangan geser dasar kondisi aliran laminar yang dihasilkan akan lebih kecil dari pada kondisi aliran turbulen. Kondisi hidrodinamik pantai diteliti secara bertahap dan diinterpretasikan menggunakan tegangan geser dasar, perbedaan fase dan faktor gesekan pada dasar kasar. Koefisien gesek untuk kondisi aliran turbulen dan di atas dasar kasar didefinisikan oleh Sana and Tanaka (2007) sebagai berikut,

$$f_w = \exp \left\{ 0,0101 \left(\frac{R_e}{R_l} \right)^{2,06} \right\} \quad \text{dengan} \quad R_l = 25 \left(\frac{a_m}{k_s} \right)^{1,15} \quad (21)$$

Mengacu pada Persamaan (19) dan (21) didefinisikan pendekatan baru kedua perhitungan tegangan geser dasar gelombang irreguler (Metode 4) untuk kondisi aliran turbulen dan di atas dasar kasar sebagai berikut,

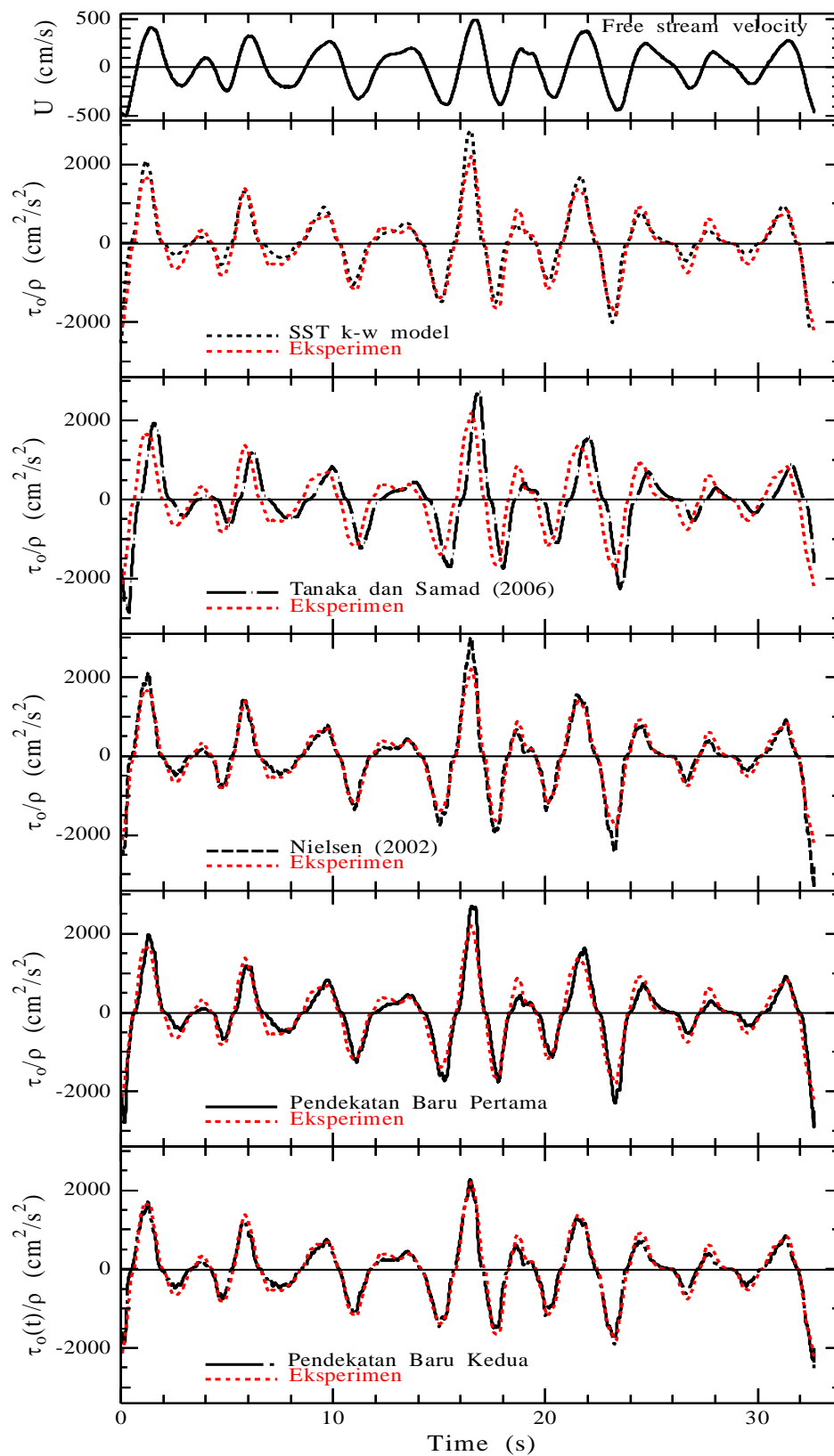
$$\tau_o(t) = 0,039 \rho \left(\frac{a_m}{k_s} \right)^{0,184} (\omega v)^{0,16} U_a(t) |U_a(t)|^{0,68} \quad (22)$$

$$U_a(t) = \left\{ U \left(t + \frac{\varphi}{\sigma} \right) + \frac{a_c}{\sigma} \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right\} \quad (23)$$

dimana a_m/k_s : parameter kekasaran, k_s dapat diperoleh dengan mengaplikasikan kekasaran sebanding Nikuradse dimana $k_s = 2,5 d_{50}$, ω : frekwensi sudut, $U_a(t)$: variasi waktu kecepatan aliran bebas seperti diusulkan Suntoyo (2008, 2009) tanpa pengaruh koefisien gesek gelombang.

Perbandingan estimasi tegangan geser dasar sepanjang siklus gelombang irreguler antara data eksperimen terhadap *SST k - ω turbulence model*, metode perhitungan eksisting, dan pendekatan baru dapat dilihat pada Gambar 2.

Pendekatan baru kedua (Metode 4) dapat memprediksi dengan baik tegangan geser dasar dan memperlihatkan kesesuaian terbaik dengan hasil eksperimen sepanjang siklus gelombang irreguler dari pada pendekatan baru pertama (metode 3), metode eksisting lain dan *SST k - ω turbulence model*. *SST k - ω turbulence model* memberikan nilai over-estimasi pada bagian puncak dan lembah tegangan geser dasar terhadap data eksperimen. Sedangkan formula Tanaka dan Samad (2006) (metode 1), formula Nielsen (2002) (metode 2), dan pendekatan baru pertama (metode 3) memberikan variasi nilai dibawah estimasi dan over-estimasi khususnya pada bagian lembah dan puncak tegangan geser dasar. *SST k - ω turbulence model* dan formula Tanaka dan Samad (2006) (metode 1) menunjukkan kesesuaian yang tidak begitu baik dengan hasil eksperimen sepanjang siklus gelombang irreguler, diakibatkan tidak memasukkan efek kecepatan dan percepatan dalam perhitungan tegangan geser dasar.



Gambar 2. Perbandingan estimasi tegangan geser dasar dengan data eksperimen Tanaka *et al.* (2002).

3.2. Formulasi Laju Transportasi Sedimen Bersih *Bed Load*

Pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar ini diaplikasikan untuk memprediksi laju transportasi sedimen bersih *bed load* gelombang irreguler. Dalam pemodelan laju transportasi sedimen dengan data eksperimen Dibajnia dan Watanabe (1998) ini dibutuhkan data inputan time series kecepatan aliran bebas. Data inputan ini diperoleh dalam bentuk *time series* kecepatan aliran bebas dengan nilai parameter gelombang yang mendekati kondisi gelombang eksperimen Dibajnia dan Watanabe (1998).

Selanjutnya data *time series* kecepatan aliran bebas dan formula pendekatan baru tegangan geser dasar digunakan pada pemodelan laju transportasi sedimen bersih *bed load*. Dalam pemodelan laju transportasi sedimen *bed load* ini digunakan dua pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar yaitu pendekatan baru pertama (metode 3) dan pendekatan baru kedua (metode 4). Kedua pendekatan baru estimasi tegangan geser dasar ini diaplikasikan untuk merumuskan laju transportasi sedimen *bed load* untuk gelombang irreguler dengan menggunakan data percobaan Dibajnia dan Watanabe (1998). *Bed load* dapat didefinisikan sebagai bagian *total sediment load*, yang secara kontinue berhubungan dengan dasar. Jadi *bed load* dapat dinyatakan sebagai fungsi tegangan geser efektif, yang terjadi secara langsung pada permukaan butiran. Laju *bed load* transportasi sedimen sesaat, $q(t)$ dapat dinyatakan sebagai fungsi *Shields number* $\tau^*(t)$ seperti yang diberikan pada persamaan berikut.

$$\Phi(t) = \frac{q(t)}{\sqrt{(\rho_s / \rho - 1)gd_{50}^3}} \\ = A \text{sign}\{\tau^*(t)\} \tau^*(t)^{0.5} \left\{ \tau^*(t) - \tau_{cr}^* \right\} \quad (24)$$

Disini, $\Phi(t)$: laju transportasi sedimen sesaat tak berdimensi, ρ_s : kerapatan material dasar, g : percepatan gravitasi, d_{50} : median diameter partikel sedimen, A : koefisien, *sign*: tanda fungsi dalam tanda parenthesis, dan $\tau^*(t)$: *Shields parameter* yang didefinisikan dengan

$$(\tau_o(t) / ((\rho_s / \rho) - 1)gd_{50}))$$

dimana $\tau_o(t)$: tegangan geser dasar sesaat. Sementara τ_{cr}^* adalah *critical Shields number* yang dihitung dengan menggunakan persamaan berikut sebagaimana yang diusulkan oleh Tanaka and To (1995),

$$\tau_{cr}^* = 0,055 \{ 1 - \exp(-0,09S_*^{0,58}) \} + 0,09S_*^{-0,72} \quad (25)$$

dimana, S_* : ukuran partikel sedimen tak berdimensi yang didefinisikan dengan persamaan:

$$S_* = \frac{\sqrt{(\rho_s / \rho - 1)gd_{50}^3}}{4\nu} \quad (26)$$

dengan ν : adalah viskositas kinematis.

Laju transportasi sedimen bersih yang dirata-ratakan terhadap satu periode gelombang diekspresikan dengan persamaan:

$$\Phi = AF \quad (27)$$

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \text{sign}\{\tau^*(t)\} \tau^*(t)^{0.5} \left\{ \tau^*(t) - \tau_{cr}^* \right\} dt \quad (28)$$

dimana Φ : laju transportasi sedimen bersih tak berdimensi dan F : fungsi *Shields parameter*. Integrasi pada Persamaan (28) diasumsikan hanya dikerjakan pada fase $|\tau^*(t)| > \tau_{cr}^*$, dan selama fase $|\tau^*(t)| < \tau_{cr}^*$ fungsi integral tersebut diasumsikan bernilai nol.

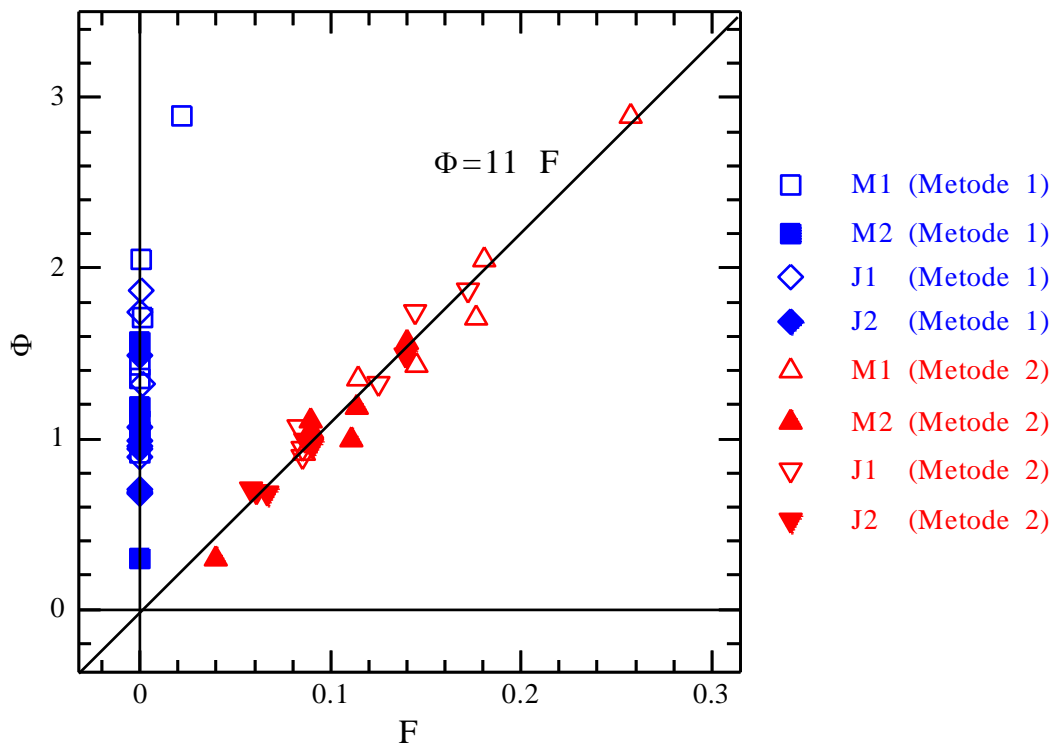
Kondisi *sheet-flow* terjadi pada saat tegangan geser dasar yang disebabkan oleh aliran air mencapai nilai batas tertentu, riak butiran pasir terhenti dan digantikan oleh pergerakan lapisan tipis pasir dengan konsentrasi yang tinggi. Swart (1974), Nielsen (2002), dan Nielsen dan Callaghan (2003) mengemukakan bahwa bilangan Nikuradse (k_s) berhubungan dengan karakteristik butiran sedimen yang dapat digunakan untuk mengoreksi faktor gesekan. Pada transportasi sedimen kondisi *sheet-flow*, nilai k_s dapat didefinisikan sebagai $k_s = 2,5 d_{50}$ dan nilai k_s dalam penelitian ini menggunakan rumusan yang sama untuk memformulasikan laju transportasi sedimen.

Lebih lanjut, profil kecepatan aliran bebas, $U(t)$ yang diperoleh dari variasi waktu deret Fourier-orde 5 persamaan Kaczmarek and Ostrowski (1996) ini diintegrasikan terhadap waktu sebagaimana pendekatan yang digunakan oleh Watanabe and Sato (2004) dalam percobaannya untuk mengekspresikan gelombang *skew* atau *saw-tooth*. Variasi waktu kecepatan aliran bebas diaplikasikan sebagai inputan data estimasi tegangan geser dasar dengan menggunakan pendekatan baru pertama (metode 3) dan pendekatan baru kedua (metode 4). Hubungan antara *dimensionless net sediment transport rate* (Φ) dan fungsi tegangan geser, F , yang dirata-ratakan dengan periode gelombang selanjutnya diperiksa untuk metode 3. Estimasi tegangan geser dasar yang dihasilkan dengan pendekatan baru pertama (metode 3) disubstitusikan ke Persamaan (28) dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3 dengan simbol-simbol \square , \blacksquare , \diamond dan \blacklozenge yang mendiskripsikan empat tipe profil kecepatan, yakni M1, M2, J1, dan J2, dimana profil kecepatan M1 dan J1 mengindikasikan derajat non-linieritas yang kuat.

Seperti terlihat bahwa pendekatan baru pertama (metode 3) tidak bisa menjelaskan *net sediment transport rate* karena hasil integral F untuk satu periode gelombang adalah nol. Dengan kata lain dapat disimpulkan bahwa metode perhitungan tegangan geser dasar yang mempertimbangkan efek percepatan dan sangat sesuai untuk perhitungan *net sediment transport rate* untuk gelombang non-linier tidak bisa diaplikasikan untuk perhitungan *net sediment transport rate* gelombang irreguler.

Selanjutnya hubungan antara F dan *dimensionless net sediment transport rate* (Φ) dengan formulasi tegangan geser dasar pendekatan baru kedua (Metode 4) yang diusulkan dalam perhitungan ini ditunjukkan dengan simbol-simbol Δ , \blacktriangle , ∇ dan \blacktriangledown . Karena efek percepatan dan koreksi faktor gesekan gelombang untuk aliran turbulen gelombang irreguler telah dimasukkan dalam estimasi tegangan geser pendekatan baru kedua (metode 4) ini seperti ditunjukkan pada Persamaan (4.20), maka menyebabkan tegangan geser pada puncak dan lembah gelombang menjadi lebih tidak simetris yang mencerminkan keacakan/irreguleritas gelombang, sehingga nilai integrasi F dalam Persamaan (22) menjadi tidak sama dengan nol. Bahkan, hasil hubungan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3 dan hubungan linier yang baik antara F dan *dimensionless net sediment transport rate* Φ terlihat.

Dengan demikian sebuah konstanta A yang ditunjukkan pada Persamaan (27) diperoleh nilai sebesar 10,92 dan dibulatkan 11.



Gambar 3. Perumusan laju transportasi sedimen.

3.3. Karakteristik Laju Transportasi Sedimen Bersih

Karakteristik *net sediment transport rate* untuk gerakan gelombang irreguler ditunjukkan dengan perbandingan antara usulan formula transportasi sedimen yang didasarkan pada penggabungan efek akselerasi dan koreksi faktor gesekan gelombang untuk aliran turbulen gelombang irreguler (metode 4) dengan data eksperimen laju transportasi sedimen *sheet flow* gelombang irreguler Dibajnia dan Watanabe (1998). *Net sediment transport rate* (q_{net}) eksperimen diperoleh dengan menggunakan hubungan *dimensionless net sediment transport rate* (Φ) dengan *net sediment transport rate* (q_{net}), yaitu Persamaan (8), dan beberapa variabel antara lain *median diameter* partikel sedimen ($d_{50} = 0.20$ mm), densitas fluida $2,65 \text{ gr/cm}^3$ dan kecepatan endap sebesar $2,3 \text{ cm/s}$.

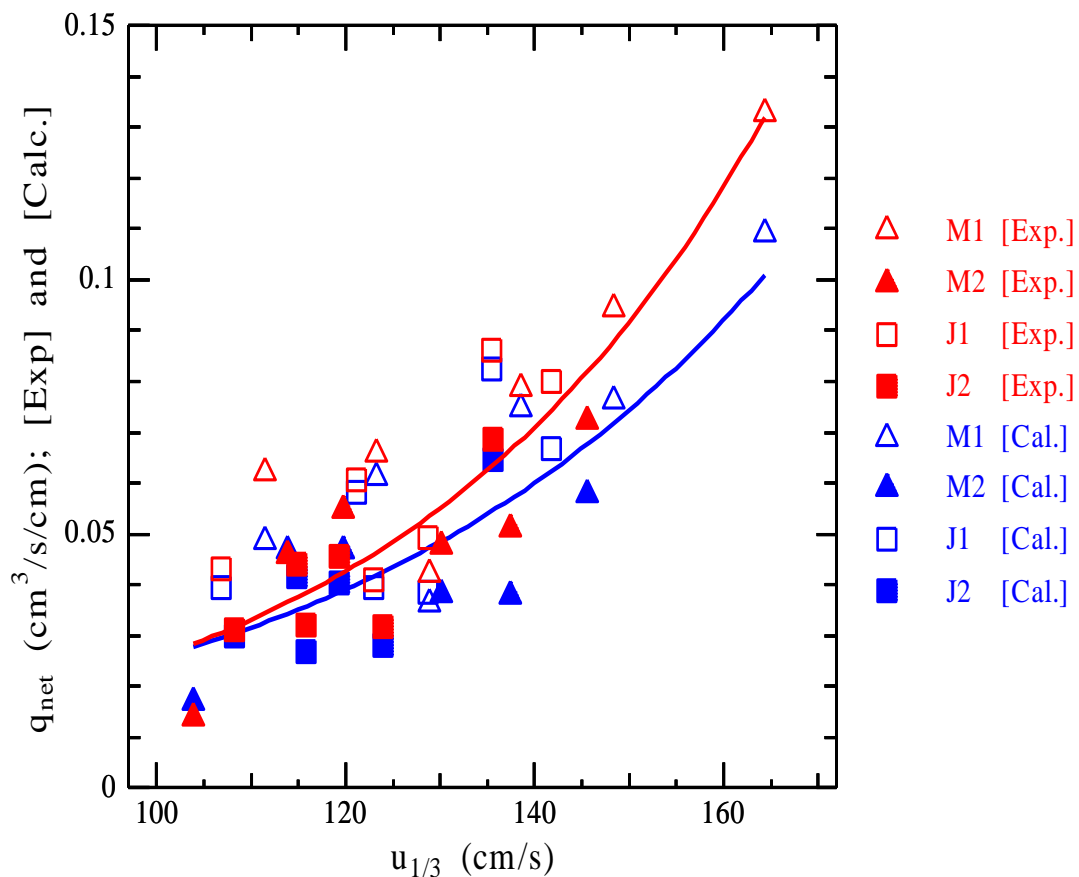
Gambar 4 menunjukkan hubungan antara harga kecepatan signifikan, $U_{1/3}$ dengan *net sediment transport rate* (q_{net}) baik eksperimen maupun formulasi laju transportasi sedimen yang didasarkan estimasi tegangan geser dasar pendekatan baru kedua (Metode 4). Seperti terlihat pada Gambar 4, bahwa peningkatan harga kecepatan signifikan, $U_{1/3}$ diikuti dengan peningkatan laju transportasi sedimen bersih hasil eksperimen maupun hasil prediksi (pemodelan numerik) dengan *trendline* berbentuk eksponensial. Keduanya menunjukkan kesesuaian bentuk yang baik meskipun ada selisih perbedaan nilai dibawah estimasi, antara laju transportasi sedimen bersih hasil eksperimen dengan hasil pemodelan numerik seiring peningkatan harga kecepatan signifikan. Nilai kesalahan (*error*) rata-rata antara data besaran laju transportasi sedimen bersih hasil

eksperimen dengan hasil prediksi adalah sebesar 10,89%. Hal ini disebabkan karena input data *free stream velocity* gelombang irreguler dengan *fourier transform* untuk harga kecepatan signifikan yang tinggi, bentuknya kurang sesuai atau tidak mendekati kondisi gelombang irreguler eksperimen, khususnya data-data dengan derajat non linieritas (ketidak linieran) yang kuat seperti profil kecepatan M1 dan J1. Parameter acuan kondisi gelombang irreguler eksperimen laju transportasi sedimen bersih *sheet flow* oleh Dibajnia dan Watanabe (1998) terdiri atas lima parameter, sedangkan penentuan parameter input variasi waktu kecepatan aliran bebas gelombang irreguler

pemodelan numerik laju transportasi sedimen bersih hanya mengacu pada dua parameter dari lima parameter acuan kondisi gelombang irreguler eksperimen.

IV. KESIMPULAN

Pendekatan baru untuk pemodelan tegangan geser kondisi dasar kasar dan transportasi sedimen akibat pergerakan gelombang irreguler telah diusulkan. Penggabungan efek percepatan dalam perhitungan tegangan geser dasar telah secara signifikan memperbaiki perhitungan transportasi sedimen untuk gelombang irreguler. Sehingga dapat dipertimbangkan bahwa pendekatan baru tegangan geser dasar ini



Gambar 4. Hubungan antara *net sediment transport rate* (q_{net}) dan $U_{1/3}$.

dapat digunakan untuk pemodelan laju transportasi sedimen akibat gelombang irreguler yang memiliki akselerasi tinggi dan irreguleritas sebagai mana yang terjadi di *surf zone* dalam aplikasi-aplikasi praktis, dengan demikian diharapkan nantinya bisa memperbaiki keakuratan dalam pemodelan morfologi pantai dalam kondisi sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahilan, R.V. and J.F.A. Sleath. 1987. Sediment transport in oscillatory flow over flat beds. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(3): 308-322.
- Al-Salem, A.A. 1993. Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet flow conditions. Dissertation, Delft University of Technology. 209p.
- Cotton, M.A. and P.K. Stansby. 2000. Bed frictional characteristics in a turbulent flow driven by nonlinear waves. *Coastal Engineering*, 40:91-117.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe. 1992. Sheet flow under nonlinear waves and currents. Proceedings of 23rd ICCE, ASCE. 2015-2028pp.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe. 1998. Transport rate under irregular sheet flow conditions. *Coastal Engineering*, 35:167-183.
- Fredsøe, J. and R. Deigaard. 1992. Mechanics of coastal sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3. World Scientific Publication. New York. 369p.
- Hsu, T.J. and D.M. Hanes. 2004. Effects of wave shape on sheet flow sediment transport. *J. of Geophysical Research*, 109 (C05025), doi:10.1029/2003JC002075.
- Huo, G., Y. Wang, B. Yin, and Z. You. 2007. The study of the bed shear stress on the irregular waves. 17th 2007 International Offshore and Polar Engineering Conference. Abstract. ISOPE 2007. Lisbon: 1 July 2007 through 6 July 2007. Code 70675.
- Jonsson, I.G. and N.A. Carlsen. 1976. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer. *J. of Hydraulic Research*, 14(1): 45-60.
- Jensen, B.L., B.M. Sumer, and J. Fredsøe. 1989. Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds numbers. *J. Fluid Mechanic*, 206:265-297.
- Kaczmarek, L.M. and R Ostrowski. 1996. Asymmetric and irregular wave effects on bed load: Theory versus Laboratory and Field Experiments. Proceeding 26th International Conference Coastal Engineering, ASCE. 3467-3480pp.
- Menter, F.R. 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 32(8):1598-1605.
- Nielsen, P. 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advances Series on Ocean Engineering. Vol. 4. World Scientific, Singapore. 324p.
- Nielsen, P. 2002. Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling. *Coastal Engineering*, 45:53-60.
- Nielsen, P. 2006. Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and

- boundary layer streaming. *Coastal Engineering*, 53:749-758.
- Rachman, T. and Suntoyo. 2011. A new method for modeling bottom shear stress under irregular waves. *IPTEK J.*, 22(2):85-94.
- Samad, M.A. 2000. Investigation of bottom boundary layer under irregular wave. Dissertation. Tohoku University, Japan. 148p.
- Samad, M.A. and H. Tanaka. 1999. Estimating instantaneous turbulent bottom shear stress under irregular wave. *J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 17(2):107-126.
- Sleath, J.F.A. 1987. Turbulent oscillatory flow over rough beds. *J. of Fluid Mechanics*, 182:369-409.
- Spielmann, K., D. Astruc, and O. Thual. 2004. Analysis of some key parameterizations in a beach profil morphodynamical model. *Coastal Engineering*, 51:1021-1049.
- Suntoyo. 2006. Study on turbulent bottom boundary layers under non-linear waves and its application to sediment transport. Dissertation. Tohoku University, Japan. 172p.
- Suntoyo, H., Tanaka, and A. Sana. 2008. Characteristics of turbulent boundary layers over a rough bed under saw-tooth waves and its application to sediment transport. *Coastal Engineering*, 55(12): 1102-1112.
- Suntoyo and H. Tanaka. 2009a. Effect of bed roughness on turbulent boundary layer and net sediment transport under asymmetric waves. *Coastal Engineering*, 56(9): 960-969.
- Suntoyo and H. Tanaka. 2009b. Numerical modeling of boundary layer flows for a solitary wave. *J. of Hydro-environment Research*, 3(3): 129-137.
- Tanaka, H., C.S. Chian, and N. Shuto. 1983. Experiments on an oscillatory flow accompanied with a unidirectional motion. *Coastal Engineering in Japan*, 26:19-37.
- Tanaka, H., and M.A. Samad. 2006. Prediction of instantaneous bottom shear stress for turbulent plane bed condition under irregular wave. *J. of Hydraulic Research*, 44(1):94-106.
- Tanaka, H., T. Suzuki, Suntoyo, and H. Yamaji. 2002. Time-variation of bottom shear stress under irregular waves over rough bed. *J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 25(2):217-225.
- Tanaka, H. and A. Thu. 1994. Full-range equation of friction coefficient and phase difference in a wave-current boundary layer. *Coastal Engineering*, 22:237-254.
- Tanaka, H., B. Winarta, Suntoyo, and H. Yamaji. 2011. Validation of a new generation system for bottom boundary layer beneath solitary wave. *Coastal Engineering*, 59:46-56.
- Tanaka, H. and D.V. To. 1995. Initial motion of sediment under wave and wave-current combined motions. *Coastal Engineering*, 25:153-163.
- Thompson, C.E.L, J.J. Williams, N. Metje, L.E. Coates, and A. Pacheco. 2012. Turbulence based measurements of wave friction factors under irregular waves on a gravel bed. *Coastal Engineering*, 63:39-47.
- Watanabe, A. and S. Sato. 2004. A sheet-flow transport rate formula for asymmetric, forward-leaning waves and currents. Proc. of 29th, ICCE, ASCE. 1703-1714pp.

Wilson, K.C., J.S. Anderson, and J.K. Shaw.
1995. Effect of wave asymetry on
sheet flow. *Coastal Engineering*,
25:191-204.